

Макет горизонтального сейсмометра с оптоэлектронным дифракционным датчиком колебаний

В. А. Комоцкий, Н. В. Суетин

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

В настоящей работе описано новое устройство для регистрации колебаний земной поверхности — сейсмометр с оптоэлектронным датчиком угловых колебаний. Приведены схема и принцип работы сейсмометра. Проведена оценка крутизны преобразования датчика. Приведены экспериментальные данные, показывающие высокую чувствительность сейсмометра с датчиком к колебаниям в определенном горизонтальном направлении и малую чувствительность колебаниям в иных направлениях.

Ключевые слова: оптика, приборостроение, дифракционные оптические элементы, сейсмометр.

Цитирование: **Комоцкий, В. А.** Макет горизонтального сейсмометра с оптоэлектронным дифракционным датчиком колебаний / В. А. Комоцкий, Н. В. Суетин // НОЛОEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 162–168.

Введение

Сейсмометры — приборы для измерения величины и формы колебаний поверхности Земли — обычно содержат следующие основные элементы: физический маятник с пружинами, демпфер колебаний маятника, датчик, который преобразует механическую характеристику колебаний маятника в электрическую величину (ток, напряжение) [1]. В качестве датчика колебаний нередко применяют катушку индуктивности, связанную с маятником, помещённую в постоянное магнитное поле. При движении маятника относительно основания, на выходах катушки возникает ЭДС, которая создаёт ток в нагрузке, и в результате формируется выходной сигнал сейсмометра. Так как ЭДС на выходах катушки пропорциональна скорости движения катушки относительно постоянного магнитного поля, то амплитуда выходного сигнала будет снижаться при уменьшении частоты колебаний. В предельном случае — при статическом отклонении маятника, — мы имеем нулевой сигнал на выходе схемы. Для улучшения чувствительности сейсмометров в области низких частот представляет интерес применение таких датчиков движения маятника, у которых выходной сигнал пропорционален величине отклонения маятника от положения равновесия, а не величине скорости движения маятника. В данном докладе рассмотрен вариант сейсмометра с датчиком, в состав которого входит лазер, блок из двух фазовых дифракционных решёток (ДР), которые расположены последовательно по ходу лазерного пучка и фотодиод. С нагрузки фотодиода мы получаем электрический сигнал, пропорциональный угловому смещению блока ДР.

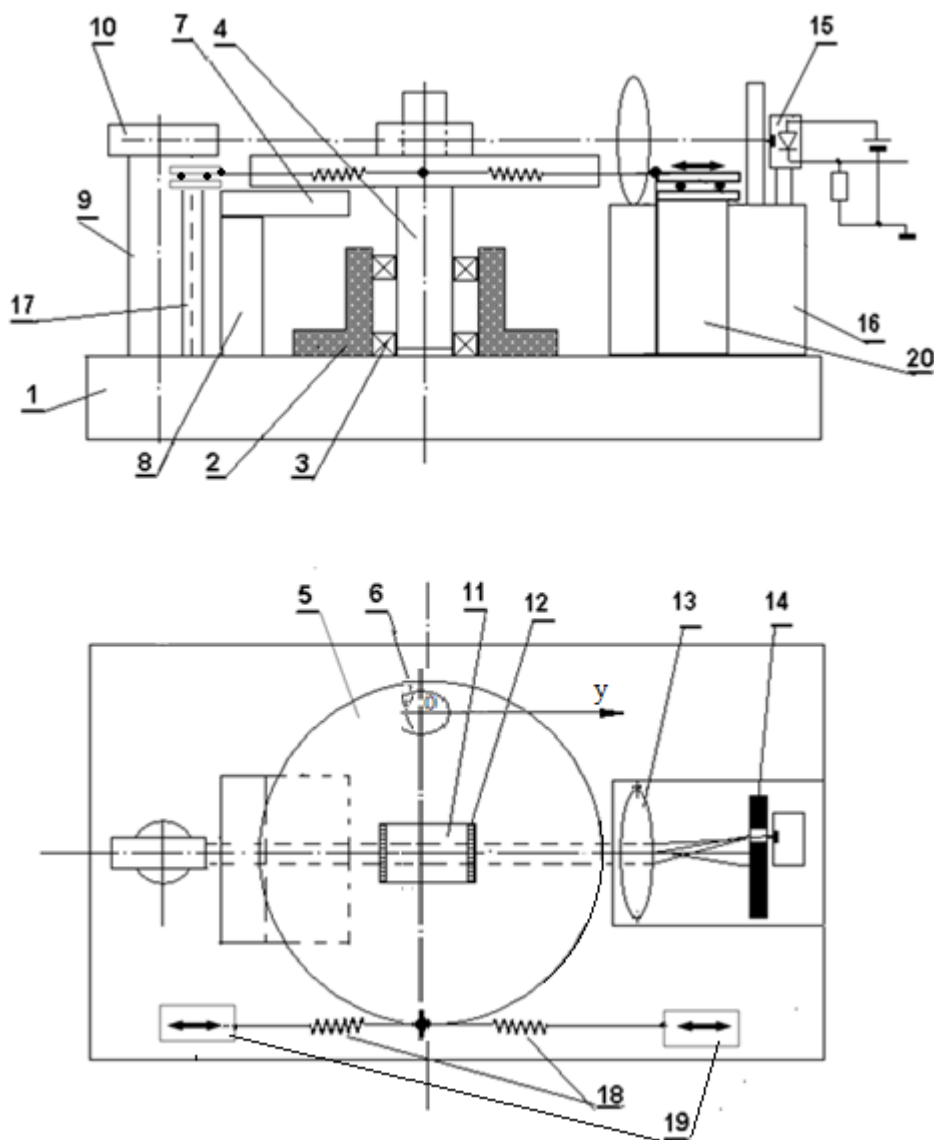


Рис. 1. Схема горизонтального сейсмометра с оптоэлектронным датчиком колебаний

1. Описание устройства

Схема сейсмометра с оптоэлектронным дифракционным датчиком колебаний маятника [2] изображена на рис. 1. На основании прибора 1 закреплена втулка 2 с подшипниками 3, в которых установлена ось вращения 4. На оси закреплён горизонтальный физический маятник, в состав которого входит диск с металлической поверхностью 5, дополнительный грузик 6 и возвратные пружины 18. Противоположные концы пружин прикреплены к регулировочным механизмам перемещения 19, которые закреплены на стойках 17 и 20. С помощью этих механизмов можно изменять натяжения пружин для исходной настройки положения маятника и связанного с ним блока-сенсора 11 в такую исходную рабочую точку, которая соответствует середине линейного участка зависимости выходного сигнала от угла поворота диска 5. Вблизи от нижней металлической поверхности диска 5, на стойке 8, расположен плоский магнит 7, действие которого обеспечивает демпфирование колебаний маятника за счёт возникновения вихревых токов в металле диска при его движении в магнитном поле.

В состав оптоэлектронного дифракционного датчика угловых движений маятника входят: лазер 10, закреплённый на стойке 9, блок ДР 11, который расположен по ходу лазерного пучка и прикреплен к диску физического маятника над осью его вращения, пространственный фильтр, установленный на подставке 16, и состоящий из линзы 13 и диафрагмы 14, которая выделяет пучок первого порядка дифракции, и фотодиод 15 в первом порядке дифракции. С выхода фотодиода мы получаем электрический сигнал, пропорциональный угловому перемещению диска маятника. Блок - сенсор представляет собой прозрачный стеклянный параллелепипед, на противоположных гранях которого расположены две рельефные фазовые дифракционные решётки 12 с прямоугольными профилями рельефов, при этом линии профилей рельефов двух решёток параллельны.

2. Предварительная настройка прибора

Прибор устанавливается на горизонтальную поверхность и ориентируется таким образом, чтобы направление движения дополнительного грузика b вдоль оси Oy при малом угловом отклонении диска от положения равновесия совпадало с направлением координаты земной поверхности, вдоль которой производится измерение колебаний поверхности Земли. После установки исходного положения диска необходимо будет дополнительно провести уточнённую тонкую настройку схемы на середину линейного участка зависимости величины сигнала на выходе фотодиода от поворота диска с блоком сенсором. Блок-сенсор расположен таким образом, что пучок излучения лазера последовательно проходит через фазовые дифракционные решётки, расположенные на гранях блока-сенсора. При повороте блока-сенсора, связанного с диском, относительно направления лазерного пучка, происходит смещение дифракционных решёток относительно лазерного пучка в противоположных направлениях, перпендикулярных к направлению оси распространения лазерного пучка, а это приводит к изменению мощности излучения в первом (и в минус первом) дифракционном порядке и к пропорциональному изменению выходного тока фотодиода. Как было установлено исследованиями, описанными в работах [3, 4], зависимость мощности излучения в первом порядке дифракции от угла поворота блока-сенсора имеет гармонический характер. Зависимости изменений мощностей излучения в первом порядке дифракции и в минус первом порядке дифракции от относительного смещения одной дифракционной решётки относительно другой решётки показаны на рис. 2. По вертикальной оси на графике отложены относительные величины: $I_{\pm 1} = \frac{P_{\pm 1}}{P_i}$, где $P_{\pm 1}$ — мощности излучения в первых порядках дифракции, а P_i — мощность на входе блока-сенсора, по горизонтальной оси величина относительного смещения к периоду ДР $\Delta x/\Lambda$.

Зависимости мощности излучения первого и минус первого порядков имеют строго гармоническую форму с периодом, равным периоду дифракционных решёток при условии, что профили рельефов решёток — прямоугольные, и ширина выступа рельефа равна ширине впадины рельефа и составляет половину периода решётки. На графике зависимости мощности первого (или минус первого) порядка дифракции существуют линейные участки. Если

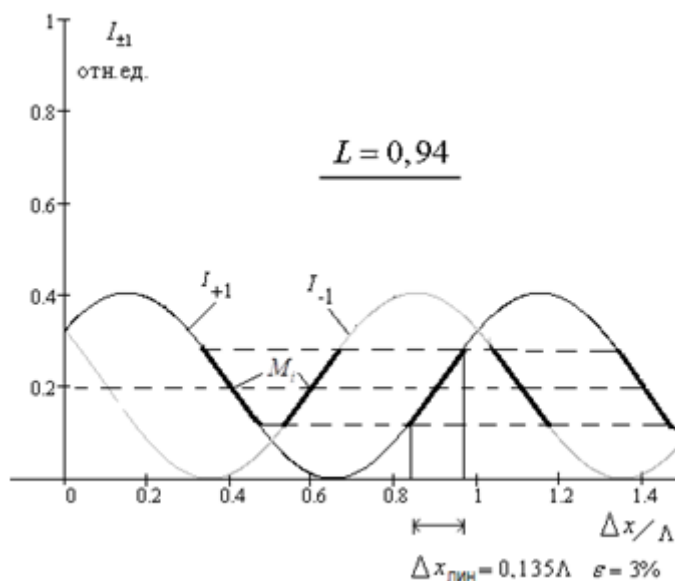


Рис. 2. Зависимости интенсивностей излучения в первых порядках дифракции от смещения одной ДР относительно второй ДР. Жирными линиями обозначены линейные участки

начальное положение блока-сенсора будет соответствовать середине одного из линейных участков этой гармонической зависимости, то при угловом отклонении диска на небольшой угол $\Delta\theta$ мощность излучения в первом порядке дифракции будет изменяться пропорционально угловому отклонению диска $\Delta\theta$. Для установки начального положения блока-сенсора проводится операция уточнённой настройки прибора. Уточнённая настройка на середину линейного участка проводится с помощью механизмов натяжения пружин 19. Изменяя натяжение пружин, мы поворачиваем диск, и вместе с этим поворачиваем блок-сенсор. При этом изменяется величина сигнала на выходе фотодетектора от нулевого до максимального значения по гармоническому закону, как это показано на рис. 2. Для осуществления точной настройки мы измеряем величину сигнала на выходе фотодетектора 15 и устанавливаем такое натяжение пружины, при котором величина сигнала на выходе фотодетектора равна средней величине между максимальным и минимальным значениями, измеренными при угловых отклонениях диска, превышающих промежуток между минимумом и максимумом выходного сигнала. После завершения уточнённой настройки при измерениях используется линейный участок зависимости выходного сигнала от углового отклонения диска.

3. Принцип работы устройства

После настройки устройство работает следующим образом: при горизонтальном движении основания устройства (вместе с поверхностью Земли) в направлении, перпендикулярном радиусу, проведённому из центра диска к грузику 6, т. е. в направлении Oy на рис. 1, происходит смещение грузика относительно основания в направлении, противоположном движению основания. Это вызывает поворот диска маятника вместе с блоком - сенсором относительно основания и изменение угла падения лазерного пучка на блок ДР. В результате изменяется мощ-

ность первого порядка дифракции лазерного пучка на выходе из блока ДР. Зависимость мощности излучения первого порядка дифракции P_1 от угла падения Θ при оптимальной глубине рельефа каждой фазовой дифракционной решётки выражается следующей формулой, приведенной в работах [4, 5].

$$P_{\pm 1}(x) = P_i [2/\pi^2 + 2/\pi^2 \cos(2\pi\theta \ell_z / \Lambda n \mp L)]. \quad (1)$$

$L = \pi \lambda \ell_z / n \Lambda^2$ — это безразмерный параметр, характеризующий расстояние между ДР, Λ — период ДР, λ — длина волны излучения лазера, ℓ_z — расстояние между ДР, n — показатель преломления материала блока ДР, P_i — мощность излучения на входе блока ДР.

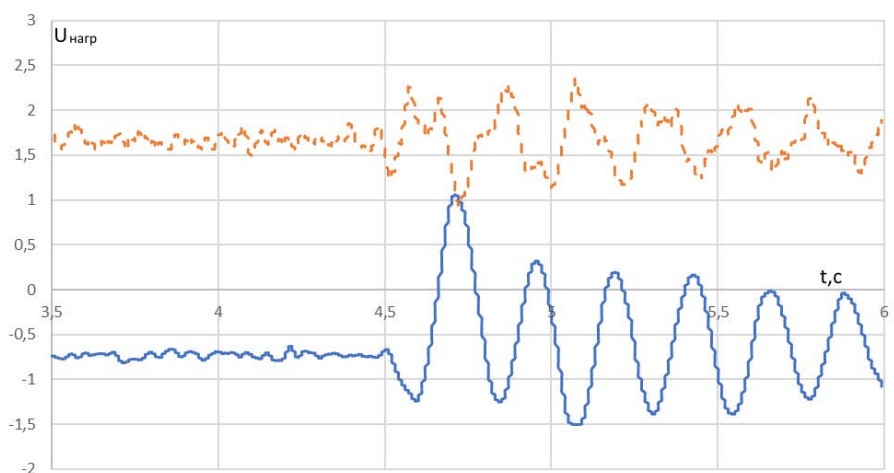
Формула (1) соответствует схеме, в которой глубины рельефов, образующих фазовые дифракционные решётки, оптимальны. Величины амплитуд пространственной фазовой модуляции волновых фронтов при прохождении каждой из решеток с оптимальной глубиной равны: $\Phi_M = \Phi_{M1} = \Phi_{M2} = \pi/4$. Именно при этом условии, достигается максимальное значение амплитуды колебаний мощностей $P_{\pm 1}(x)$ при смещении одной из ДР относительно другой. На линейном участке зависимости мощности от угла поворота блока ДР крутизна преобразования величины угла поворота блока в величину изменения мощности первого порядка дифракции равна

$$S_{\Theta-P} = \frac{dP_1}{d\Theta} = \frac{4}{\pi} P_i \frac{\ell_z}{n\Lambda}. \quad (2)$$

4. Экспериментальное исследование макета сейсмометра с оптоэлектронным датчиком колебаний

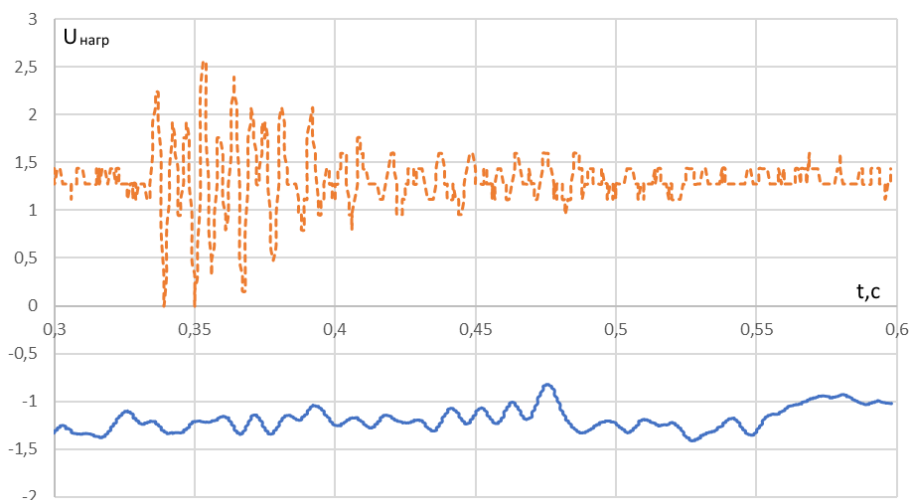
Макет горизонтального сейсмометра был сконструирован, в основном, в соответствии со схемой, изображённой на рис. 1. Диск физического маятника был изготовлен из фанеры толщиной 8 мм, при этом к нижней поверхности диска, которая обращена к магниту, был приклеен диск из фольгированного медью стеклотекстолита. Диаметр диска был равен 200 мм. Период собственных колебаний маятника составлял 0,8 с. Параметры блока-сенсора в экспериментальной установке были следующими: $\ell_z = 13$ мм, $\Lambda = 0,1$ мм, $n = 1,51$. При условии, что эффективная мощность полупроводникового лазера на входе составляла $P_i = 5$ мВт, расчётная крутизна равна: $S_{\Theta-V} = 548$ мВт/радиан. В первом порядке дифракции был установлен фотодетектор ФД-25к с резистором нагрузки 10 кОм. На выходе схемы была подключена схема усиления и фильтрации с коэффициентом усиления 10 и полосой 1,4 кГц.

При испытаниях макет прибора был установлен на массивном столе, который приводился в движение ударом. Параллельно, на этом же столе был установлен серийный сейсмометр СМ-3 для сопоставления реакций двух приборов на механическое возмущение. На рис. 3 приведены осциллограммы, записанные с выходов этих приборов. Сходство двух осциллограмм подтверждает работоспособность макета и достоверность результатов измерений. Вместе с тем, предстоит поставить специальные эксперименты, чтобы установить различие характеристик этих приборов при регистрации колебаний в области низких частот.



Пунктирная линия — напряжение на выходе сейсмометра с электромагнитным датчиком СМ-3,
Сплошная линия — с оптоэлектронным датчиком

Рис. 3. Напряжения на выходе сейсмометров с оптоэлектронным и электромагнитным датчиком при воздействии на стол в исследуемом направлении



Пунктирная линия — напряжение на выходе сейсмометра с электромагнитным датчиком СМ-3,
Сплошная линия — с оптоэлектронным датчиком

Рис. 4. Напряжения на выходе сейсмометров с оптоэлектронным и электромагнитным датчиком при вертикальном воздействии на стол

Дополнительно, следует отметить, что макет прибора с оптоэлектронным датчиком практически не реагировал на ударные возмущения по двум другим координатам (Ox и Oz), в то время как сейсмометр СМ-3 демонстрировал заметную реакцию на такие воздействия, как видно из осциллограмм, приведенных на рис. 4.

Заключение

Описанный в работе сейсмометр с оптоэлектронным дифракционным датчиком угловых колебаний отличается высокой крутизной преобразования и чувствительностью при исследовании колебаний поверхности в определенном горизонтальном направлении (Ox). При этом

чувствительность устройства к колебаниям в вертикальной плоскости (Oz), а также в направлении Oy очень мала в отличии от электромагнитного сейсмометра. Чувствительность и крутизна преобразования датчика могут регулироваться в широких пределах путем изменения периода ДР или расстояния между ДР. Конструкция устройства достаточно проста и надежна, стоимость комплектующих не высока, технология изготовления ДР доступна. Все это дает возможность применять предложенное устройство при проведении сейсмических исследований.

Список источников

- [1] **Аранович, З. И.** Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР / З. И. Аранович, Д. П. Кирно, В. М. Фремд. — М. : Наука. — 1974. — 245 с.
- [2] **Патент № 203735U1 RU.** Горизонтальный сейсмометр с оптоэлектронным дифракционным датчиком колебаний / В. А. Комоцкий, Н. В. Суетин. — Опубл. 19.04.2021.
- [3] **Комоцкий, В. А.** Исследование датчика малых линейных перемещений на основе двух фазовых дифракционных решёток / В. А. Комоцкий, В. И. Корольков, Ю. М. Соколов // Автометрия. — 2006. — Том 42. — № 6. — С. 105–112.
- [4] **Комоцкий, В. А.** Оптоэлектронные дифракционные датчики малых угловых перемещений / В. А. Комоцкий, В. И. Корольков, Ю. М. Соколов // Фотоника. — 2011. — № 1. — С. 16–19.
- [5] **Комоцкий, В. А.** Анализ интенсивностей дифракционных порядков в оптической схеме, содержащей две фазовые дифракционные решетки / В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов // Вестник РУДН. Серия физика. — 2006. — № 1. — С. 90–95.